

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Rozbor problematiky napět'ové nesymetrie
Analysis of Voltage Unbalance Problems

Zadání bakalářské práce

Student: **Karel Neumann**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Rozbor problematiky napětové nesymetrie**
Analysis of Voltage Unbalance Problems

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor problematiky nesymetrie v třífázových soustavách
2. Zdroje nesymetrie a možnosti jejího snižování
3. Ukázka vyhodnocení nesymetrie napětí v distribučních sítích

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Horák, K., Drábek, J., Paleček, J., Pokorný, M.: Energetika a trakce, skriptum VŠDS v Žilině, Alfa Bratislava, 1983
2. Hradílek, Z.: Elektroteplná technika, skriptum VŠB - TU Ostrava, 1996
3. Další literatura podle pokynu vedoucího bakalářské práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Karel Neumann
.....
Karel Neumann

Datum odevzdání: 6. 5. 2011

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval panu doc.Ing. Krejčímu Ph.D. za odborný dohled, cenné připomínky, ochotu a čas, který mi věnoval při tvorbě této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je definování napěťové nesymetrie. V první části se popisuje vyčíslení napěťové nesymetrie a metody k jejímu snížení. Jako hlavní zdroje nesymetrie byly vybrány elektrické obloukové pece a jednofázová elektrická trakce 25kV/50 Hz, jejich popis vlastností a možnosti snížení v praxi. Ve druhé části byly zpracovány naměřené hodnoty napětí distribučních sítí z určité části České republiky do grafu. Nakonec byla vyhodnocena velikost napěťové nesymetrie pomocí grafu.

Klíčová slova

napěťová nesymetrie, proudová nesymetrie, zkratový výkon, jmenovité napětí, jednofázový transformátor, jednofázová zátěž, fázor

Abstract

The aim of the thesis is to define what voltage unbalance is. The first part defines the calculation of voltage unbalance and various ways to decrease it. As the main sources of the unbalance electric arc furnace and a single-phase electric traction 25kV/50 Hz, their description and possibilities to decrease it in practice were chosen. In the second part, a bar chart illustrates actual measured values from distribution networks in certain part of the Czech Republic and the voltage unbalance is determined.

Keywords

voltage unbalance, current unbalance, short circuit power, rated voltage, single-phase transformer, single phase load, phasor

Seznam použitých zkratek

A	Fázor, komplexní číslo
A^*	Číslo komplexně sdružené
A	Velikost, modul
$A_{(0)}$	Nulová složka
$A_{(1)}$	Sousledná složka
$A_{(2)}$	Zpětná složka
C	Kapacita (F)
I	Proud (A)
L	Indukčnost (H)
R	Odpor (Ω)
S	Zdánlivý výkon (V.A)
U	Napětí (V)
X	Reaktance (Ω)
Z	Impedance (Ω)
$\cos \varphi$	Účinník (-)
f	Frekvence (Hz)
α, φ	Úhel ($^\circ$)
ρ_u	Součinitel napěťové nesymetrie (%)

Obsah

Úvod.....	1
1. Definice nesymetrie.....	2
1.1 Typy nesymetrie.....	2
1.2 Vyčíslení nesymetrie.....	2
1.2.1 Výpočet napěťové nesymetrie ze zkrat. poměrů při jednofázové zátěži.....	4
1.4 Příklady metod symetrizace	6
1.4.1 Steinmetzovo zapojení	6
1.4.2 Scottův transformátor	8
1.4.3 Zapojení LeBlanc	9
2. Hlavní zdroje nesymetrie	10
2.1 Elektrické pece	10
2.1.1 Elektrická oblouková pec	10
2.1.2 Elektrická oblouková pec připojena na síť VN	11
2.1.3 Možnosti snížení rušivých účinku elektrických obloukových pecí na napájecí síť	12
a) Omezení zkratových a velkých proudů.....	12
2.1.4 Kanálková indukční pec	14
2.1.5 Připojení kanálkových pecí k síti	14
2.2 Elektrická trakce a elektrická vozba.....	18
2.2.1 Nevýhody elektrické trakce.....	18
2.2.2 Rozdělení elektrické trakce v ČR.....	18
2.2.3 Závislá trakce	19
2.2.4 Trakční napájecí stanice pro soustavu 25 kV, 50 Hz-Trakční transformovny	19
2.2.5 Paralelní spolupráce trakčních transformoven 25kV, 50 Hz.....	21
2.2.6 Vliv jednofázových drah na symetrii sítě vvn	23
2.2.7 Speciální konstrukce transformátorů.....	24
2.2.8 Možnosti omezení nesymetrie.....	25
3. Ukázka vyhodnocení nesymetrie napětí v distribučních sítích	27
Závěr	30

Seznam použité literatury	31
Seznam obrázků	32
Seznam grafů.....	32

Úvod

Napěťová nesymetrie je problematika, která znehodnocuje kvalitu elektrické energie, a tudíž se snažíme tento problém alespoň částečně omezit na dovolenou hodnotu dle normy ČSN EN 50160. Úvodem této bakalářské práce si přiblížíme co je napěťová nesymetrie, její kvantifikaci a symetrizaci.

Napěťová nesymetrie nemůže být úplně vymazána z distribučních sítí, jelikož jsou na ni připojeny takové spotřebiče, které ji stále obnovují. A jako další bod bakalářské práce je definice hlavních zdrojů nesymetrie. Prvním zdrojem nesymetrie je elektrická trakce, kde nás podstatně zajímá z pohledu napěťové nesymetrie střídavý trakční rozvod 25kV/50 Hz, kterou můžeme snížit různými zapojení transformátorů (Le Blanc, Scottovo a třífázové).

Druhým zdrojem nesymetrie jsou jednofázové elektrické pece. Podrobněji si rozebereme pece odporové a indukční, jejich připojení do sítě a snížení kompenzačními obvody. Na závěr jsem z naměřených dat provedl ukázkou napěťové nesymetrie pomocí grafů, kde se porovnává nesymetrie mezi napěťovými hladinami (NN, VN, VVN) a vyhodnocuje zda-li určitý rozvod splňuje přípustné meze nesymetrie. Primárním cílem této bakalářské práce tedy je analýza a průzkum zdrojů nesymetrie v praxi a možnosti jejího omezení.

1. Definice nesymetrie

V trojfázových soustavách se za nesymetrické (i podle norem, např. ČSN STN IEC 50 161) všeobecně považují takové tři fázory, jejichž velikosti nejsou stejné nebo jejich vzájemné natočení v komplexní rovině není stejné, tj. 120° . Tato definice platí pro napětí i pro proudy. Pokud posuzujeme soustavu napětí a proudů, potom k podmínkám symetrie (stejná velikost a stejné vzájemné natočení fázorů) přistupuje ještě podmínka stejného sledu fází napětí a proudů.[4]

1.1 Typy nesymetrie

Můžeme rozlišit dva typy nesymetrie: amplitudovou a úhlovou. Jestliže se liší velikosti proudů (napětí) v jednotlivých fázích, pak mluvíme o nesymetrii amplitudové, jsou-li nestejné úhly mezi fázory jednotlivých proudů (napětí), pak hovoříme o nesymetrii úhlové. Nejčastěji však vzniká nesymetrie obecná, tedy amplitudová i úhlová současně. Podle výsledku součtu fázorů jednotlivých fází může být soustava buď vyvážená (součet fázorů je roven nule) nebo nevyvážená (součet fázorů je různý od nuly).[3]

1.2 Vyčíslení nesymetrie

K vyčíslení nesymetrie napětí nebo proudu trojfázového systému, jsou používány tzv. „Fortescue“ nebo symetrické složky. Trojfázový systém se rozkládá na tzv. sousledný neboli stejnosměrný, zpětný a netočivý neboli nulový systém, označován indexy 0, 1, 2. Vypočítány jsou pomocí maticových transformací fázorů trojfázového napětí a proudu. Indexy A,B,C uvádějí rozdílné fáze. Výrazy zde uvedené jsou formulovány pro napětí U, ale tato proměnná může být nahrazena bez jakýchkoli problémů proudem I:[3]

$$\begin{pmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{(0)} \\ \mathbf{U}_{(1)} \\ \mathbf{U}_{(2)} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

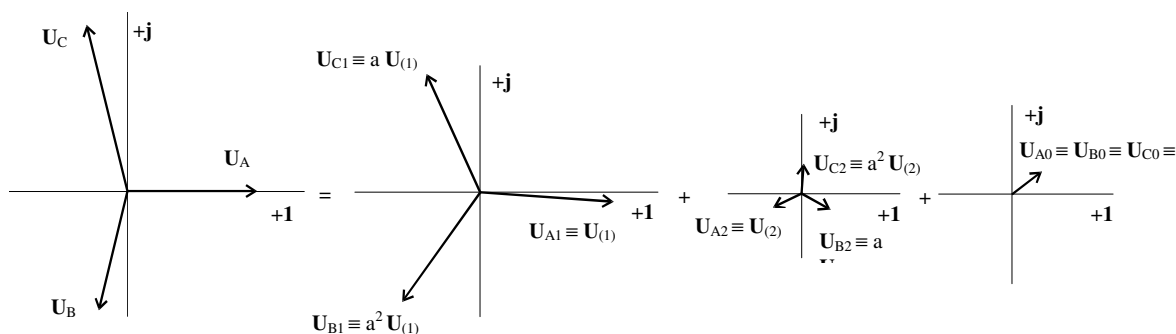
$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{(0)} \\ \mathbf{I}_{(1)} \\ \mathbf{I}_{(2)} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{U}_{(0)} \\ \mathbf{U}_{(1)} \\ \mathbf{U}_{(2)} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_{(0)} \\ \mathbf{I}_{(1)} \\ \mathbf{I}_{(2)} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

V těchto výrazech jsou vztahy mezi symetrickými a nesymetrickými soustavami vyjádřeny pomocí operátoru \mathbf{a} , pro který platí:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \mathbf{e}^{j120} = -\frac{1}{2} + \mathbf{j} \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \mathbf{a}^2 &= \mathbf{e}^{j240} = -\frac{1}{2} - \mathbf{j} \frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \quad (1.5)$$



Obr.1 Náhrada nesouměrné soustavy soustavou souslednou, zpětnou a nulovou[2]

Poměr amplitudy zpětné a sousledné složky napětí U a proudu I je měřítkem nesymetrie –označován jako činitel nesymetrie ρ (v %):

$$\rho_u = \frac{|\mathbf{U}_{(2)}|}{|\mathbf{U}_{(1)}|} \cdot 100\% \quad (1.6)$$

Tyto ukazatelé jsou například používány v normách, které se zabývají kvalitou elektrické energie, jako EN 50160 nebo IEC řada 1000-3-x. Podobný ukazatel se někdy využívá pro poměr amplitudy nulové a souměrné složky. Je označován jako činitel nevyváženosti. Jednodušší, přibližný způsob pro výpočet činitele nesymetrie je:

$$\rho_u = \frac{S_L}{S_K} \cdot 100\% \quad (1.7)$$

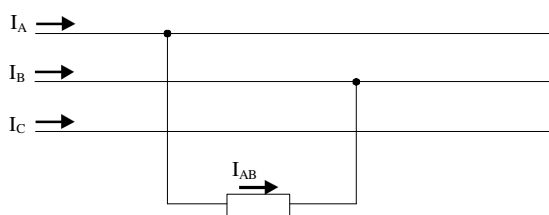
Tento výpočet užívá pouze zdánlivý výkon zátěže S_L a zkratový výkon S_K napájecího obvodu. Kompletní měřicí procedury k určení těchto parametrů jsou popsány v normách. Používají statistické techniky k určení průměru (1.6),(1.7) pro určitý definovaný časový interval.[7]

1.2.1 Výpočet napěťové nesymetrie ze zkrat. poměrů při jednofázové zátěži

Součinitel napěťové nesymetrie ρ_u je možné pro případ jednofázového připojení přibližně vypočítat ze zjednodušeného vztahu, který určíme následovně:

$$\rho_u = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 = \frac{I_{(2)} \cdot Z_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (1.8)$$

kde $Z_{(2)}$ je impedance zpětné složky v místě připojení.



Obr. 2 Připojení jednofázové zátěže k trojfázové soustavě[3]

Podle obr. 1.4 platí :

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_{AB}, \quad \mathbf{I}_B = -\mathbf{I}_{AB}, \quad \mathbf{I}_C = 0 \quad (1.9)$$

s využitím (1.4) určíme zpětnou složku proudu:

$$\mathbf{I}_{(2)} = (\mathbf{I}_A + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_B + \mathbf{a} \mathbf{I}_C) / 3 = \mathbf{I}_{AB} (1 - \mathbf{a}^2) / 3 \quad (2.0)$$

a její absolutní hodnotu:

$$I_{(2)} = \frac{1}{3} I_{AB} \left| \left(1 + \frac{1}{2} + \mathbf{j} \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right| = \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

dosazením do (1.46) dostaneme vztah:

$$\rho_u = \frac{I_{AB} \cdot Z_{(2)}}{\sqrt{3} \cdot U_{(1)}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

a jeho úpravou:

$$\rho_u = \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{(1)}}{U_{(1)}} \cdot \frac{Z_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 = I_{AB} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{(1)} \cdot \frac{Z_{(2)}}{3 \cdot U_{(1)}^2} \cdot 100 \quad (2.3)$$

První část vztahu (2.3) odpovídá odebíranému jednofázovému výkonu S_{1f} . Druhou část můžeme nahradit převrácenou hodnotou třífázového zkratového výkonu S_{k3}'' , který obecně určujeme:

$$S_{k3}'' = \frac{3 \cdot c \cdot U_v^2}{Z_{(1)}} \quad (2.4)$$

s těmito zjednodušeními:

- hodnotu součinitele c uvažujeme 1
- vztažné napětí U_v bereme rovno sousledné složce napětí
- pro celkovou impedanci sousledné složky $Z_{(1)}$ mezi napájecí stanicí a všemi zdroji v soustavě, kde jsou zdroji převážně turboalternátory, platí přibližně $Z_{(1)} = Z_{(2)}$.

Potom z (1.51) dostaneme přibližný vztah pro součinitel napět'ové nesymetrie:

$$\rho_u = \frac{S_{1f}}{S_{k3}''} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Tento vztah dovoluje (při zadané mezní nesymetrii) určit maximální výkon jednofázového odběru, který je možno připojit na třífázovou síť v daném místě. Zkratové výkony v místech připojení se vypočítají z údajů energetiky. Čím je síť tvrdší, tím je možné připojit větší jednofázové odběry bez obav z překročení povolené hodnoty napět'ové nesymetrie.[3]

1.3 Metody symetrizace

Symetrizovat výkon je možno několika metodami různými technickými prostředky a různým stupněm technické a finanční náročnosti. Použití polovodičových prvků (především řízených) zatím naráží na jejich proudovou zatížitelnost a napět'ovou pracovní hladinu.

1. Odmítám symetrizovat z různých důvodů.

"Jednoduchá" a "levná" metoda. Nemusí ale být metodou nejjednodušší a nejlevnější.

2. Částečná symetrizace pouze transformátorem.

Jednoduchá, spolehlivá, samoregulační a levná metoda. Neřeší změněné fázové posuny a rozložení výkonů, které přenáší jednotlivé síťové vodiče.

3. Úplná symetrizace pouze transformátorem dvou odběrů.

Pro nezávislé zátěže je prakticky nerealizovatelná. Metoda vyžaduje současnou regulaci obou odběrů tak, aby byly vždy splněny symetrizační podmínky.

4. Úplná symetrizace pomocí reaktancí - Steinmetzovo zapojení.

Statická metoda. Zátěž musí být vždy plně kompenzována a filtrována. Symetrizační a filtrační impedance musí být laděné.

5. Úplná symetrizace pomocí nepřímého frekvenčního měniče.

Dynamická metoda. Zvláště pro velké výkony je finančně a technicky náročná. Stejnoseměrný meziobvod je napájen pasivním / aktivním usměrňovačem.

6. Úplná symetrizace pomocí maticového měniče - přímého měniče kmitočtu. Nově vyvíjená dynamická metoda, která umožní snížení počtu fází. Bude zřejmě vhodná pro přenos velkých výkonů a její finanční náročnost bude menší než nepřímého frekvenčního měniče.

Zde odpadá stejnosměrný meziobvod napětového či proudového typu. Výstupní obvod je napájen aktivně řízenými polovodičovými prvky.

7. Úplná symetrizace pomocí aktivního filtru. Dynamická metoda. Zvláště pro velké výkony je finančně a technicky náročná.

8. Úplná symetrizace pomocí hybridního modelu s využitím několika metod současně.

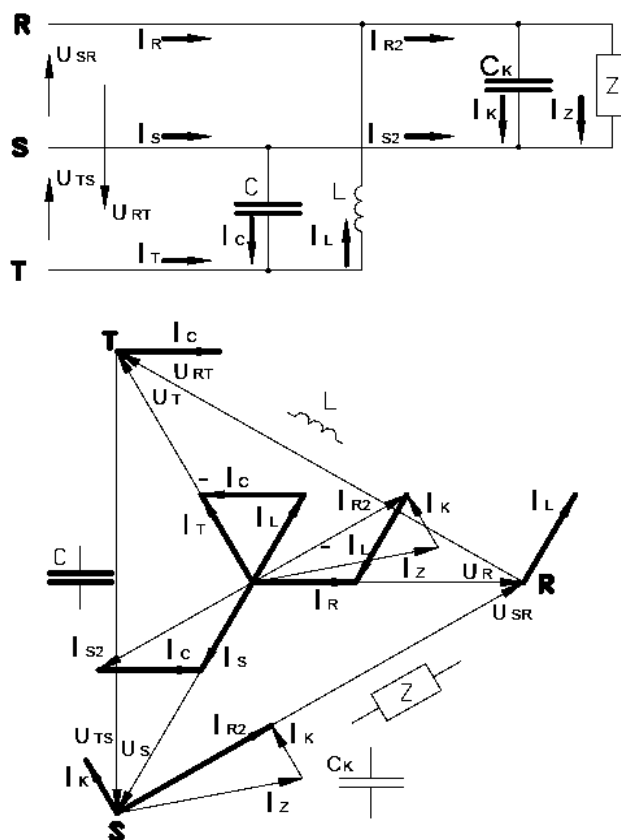
Spotřebiče velkých příkonů mívají svůj vlastní transformátor napájený z distribuční soustavy vn nebo vvn. Zde bude výhodné použít třífázový transformátor s terciárním vinutím. Izolované terciární vinutí zajistí galvanické oddělení od sítě, omezení přenosu napětových špiček a umožní napětové a proudové přizpůsobení součástek požadovanému odběru. Na terciární vinutí budou připojena symetrizační zařízení.[4]

1.4 Příklady metod symetrizace

1.4.1 Steinmetzovo zapojení

Steinmetzovo zapojení je metoda pro symetrizaci lineární zátěže konstantní velikosti. Proud zátěže musí být vždy plně kompenzován a filtrován laděnými impedancemi. Pro skutečný proměnlivý odběr musí být zapojení vybaveno řízenými reaktancemi pro kompenzaci a symetrizaci. Použití nelineární zátěže vyžaduje aplikaci filtrů, které upraví proud tak, aby opravdový účinník - Total Harmonic Distortion $THD = 0$ a současné $PF = 1$. [1]

Když se jalový výkon cívky a kondenzátoru rovná činné energii zátěže, dělené, jeví se zátěž z pohledu trojfázové sítě jako symetrická. Trojfázový jmenovitý výkon transformátoru se rovná činnému výkonu jedné fáze zátěže. Je třeba poznamenat, že vyrovnání je pouze ideální pro činný výkon odpovídající hodnotě pro který byl systém navržen.[4]



Obr. 3 Schéma Steinmetzova zapojení[4]

Jednotlivé symboly principiálního schématu:

$U_{RT}; U_{TS}; U_{ST}$ sdružená síťová napětí

$U_R; U_S; U_T$ fázová síťová napětí

$I_R; I_S; I_T$ fázové - síťové proudy

I_Z proud zátěže

I_K proud kompenzující a filtrující proud zátěže

$I_{R2}; I_{S2}$ vykompenzovaný a vyfiltrovaný proud zátěže

$I_L; I_C$ proudy Steinmetzových reaktancí

Mezi proudy platí vztahy:

Vykompenzovaný a vyfiltrovaný proud zátěže ($PF = 1$) $I_{R2} = -I_{S2} = I_K + I_Z$

Fázový - síťový proud - fáze R

$$I_R = I_{R2} - I_L$$

Fázový - síťový proud - fáze S

$$I_S = I_{S2} + I_C$$

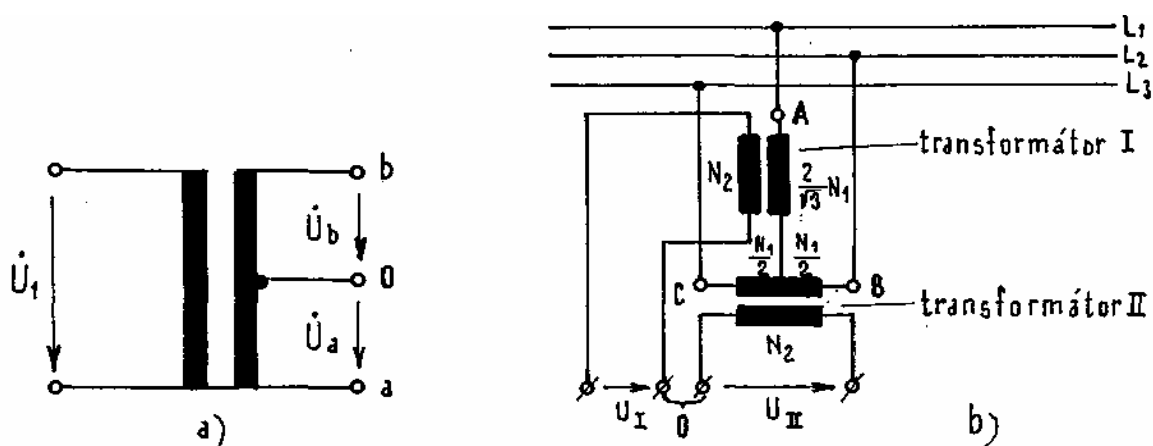
Fázový - síťový proud - fáze T

$$I_T = I_L - I_C$$

Odebíranému výkonu musí být přizpůsobovány kapacity kompenzačně filtračního kondenzátoru C_K , a Steinmetzova kondenzátoru C a také indukčnost Steinmetzovy tlumivky L . [4]

1.4.2 Scottův transformátor

Je-li nutné napájet ze sítě spotřebiče, která má jiný počet fází, než je počet fází spotřebiče, nastane problém přeměny počtu fází soustavy. Přeměna jednofázové soustavy ve dvoufázovou symetrickou se dosáhne jednofázovým transformátorem. Při vázané dvoufázové soustavě se vyvede střed výstupního vinutí. Transformace třífázové symetrické soustavy na dvoufázovou soustavu (nebo naopak) tvořenou dvěma, co do hodnoty stejně velkými napětími posunutými fázově o úhel $\Pi/2$ se dosáhne dvěma jednofázovými transformátory, zapojenými podle obrázku 3. [8]



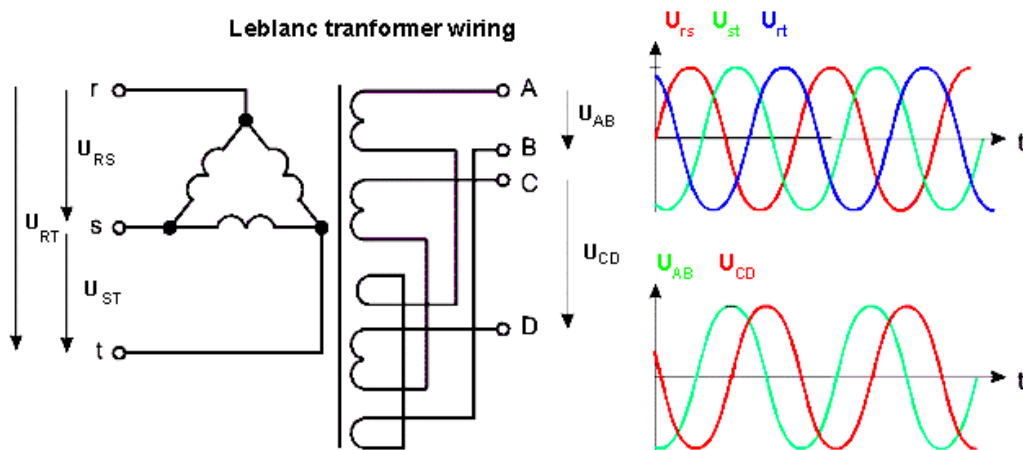
Obr.4 a) Transformace jednofázové soustavy na dvoufázovou [8]

b) Transformace trojfázové soustavy na dvoufázovou (Scottovo zapojení)

Scottův transformátor se skládá ze dvou jednofázových transformátorů, se speciálním poměrem vinutí, připojených k trojfázovému systému. Transformátory jsou připojeny takovým způsobem, že na výstupu je generováno dvojfázové ortogonální napětí, které dovoluje připojení dvoufázového systému. Tato sestava dodává symetrický trojfázový výkon do soustavy. [7]

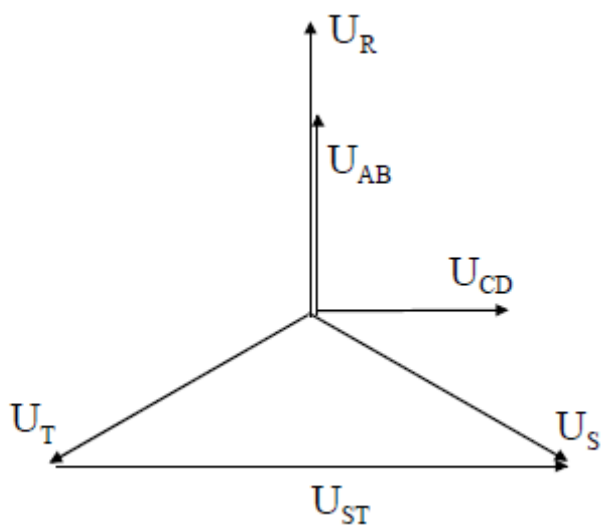
1.4.3 Zapojení LeBlanc

Transformace třífázového na dvoufázový transformátor umožňuje, že na třífázové straně sítě, střídavé proudy odpovídají symetrickému systému.



Obr.5 Zapojení LeBlancova transformátoru[11]

Zastoupení napětí fázorů na Obr. 5 ukazuje , že dvoufázové výstupní napětí jsou posunuty o 90° a orientované na fázi U_R .



Obr.6 Fázorový diagram LeBlancova zapojení[11]

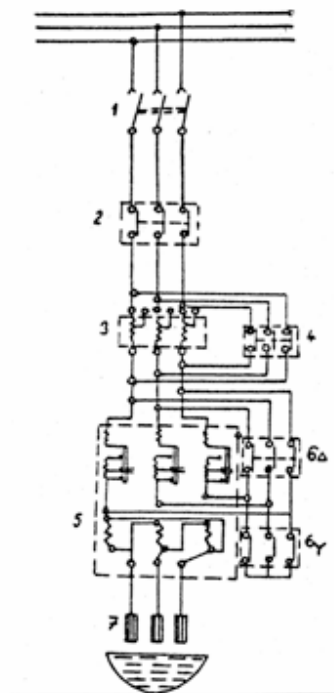
2. Hlavní zdroje nesymetrie

2.1 Elektrické pece

Typickými rušivými spotřebiči jsou elektrické obloukové pece, protože mívají velké příkony (50 MVA). Obloukové pece se využívají pro tavení kovů (např. při výrobě oceli) a využívají elektrického oblouku. Dynamický charakter tavení (velké změny proudů během tavení) způsobuje při provozu pecí fázovou nesymetrii a dynamické odchylky napětí. [6]

2.1.1 Elektrická oblouková pec

V elektrické obloukové peci se vsázka (tavenina) taví elektrickým obloukem, který hoří mezi třemi grafitovými elektrodami a vsázkou. Teplota oblouků je 3000 až 4000°C. Pec je obvykle připojena na síť 22kV a pecní transformátor přeměňuje (transformuje) toto napětí na napětí cca 100 až 220V u menších a středních typů pecí a u velkých obloukových pecí až na 600V.



Obr.7 Schéma připojení elektrické obloukové pece[6]

2.1.2 Elektrická oblouková pec připojena na síť VN

Napájecí síť vn elektrických obloukových pecí je zatěžována nepravidelně proměnlivými špičkami proudů, které se pohybují od nulových hodnot při přerušení oblouku až po trojnásobek jmenovitého proudu při zkratu elektrody s taveninou. Toto nepravidelné kolísání proudů způsobuje na příslušných impedancích napájecí sítě kolísání napětí, které nepříznivě ovlivňuje ostatní elektrická zařízení, napájena z téže soustavy. Velmi citlivé na toto proměnlivé kolísání napětí jsou zejména rentgenová zařízení, televizory, počítače.

Důležitým činitelem pro posouzení napájecí sítě VN elektrických obloukových pecí je zkratový výkon v místě zapojení pecí na energetický systém. Především je nutno oddělit systém napájení elektrických obloukových pecí od spotřebičů, zejména těch, které jsou citlivé na změny napětí. V těchto případech je nutno provést výpočet, zda zkratový výkon v místě napojení elektrické obloukové pece zaručuje udržení rušivých účinků na síť v přijatelných mezích. Rušivý účinek kmitání napětí je pozorovatelný při odchylkách 0,5% napětí od jmenovité hodnoty a četnosti výskytu těchto odchylek v 6 až 8 kmitech za sekundu. Tyto odchylky v napětí jsou způsobovány změnami jmenovitého proudu 0 až 30% I_N . [1]

$$S_K = \frac{U_N^2}{Z} \quad (MVA) \quad (2.6)$$

U_N jmenovité napětí sítě

Z síťová impedance v místě napojení

Odchylky 30% I_N mají u síťové impedance Z způsobit pokles napětí nejvýše 0,5 % U_N

$$Z = \frac{0,5U_N}{30I_N} \quad (\Omega) \quad (2.7)$$

Dosadíme-li tento vztah pro síťovou impedanci Z do rovnice pro zkratový výkon S_K dostáváme tak nutný poměr trvalého zkratového výkonu S_K k připojenému výkonu pecního transformátoru S_{TP} .

$$S_K = \frac{U_N^2 \cdot 30I_N}{0,5U_N} = 60 \cdot S_{TP} \quad (2.8)$$

Podle tohoto vztahu musí být trvalý zkratový výkon v místě napojení přívodu pro elektrické obloukové pece 60krát tak velký jako výkon pecního transformátoru. Jestliže nemá být překročeno kolísání napětí ve výši 0,35% U_N , tj. podmínka pro hranici pozorovatelnosti rušivých jevů, vznikne poměr:

$$S_K = 85 \cdot S_{TP} \quad (2.9)$$

Jsou-li na danou napájecí síť zapojeny další elektrické obloukové pece, pak ekvivalentní zkratový výkon pro hranici rušení je:

$$S_K = 60 \cdot \sqrt{S_{T1}^2 + S_{T2}^2 + \dots + S_{Tn}^2} \quad (3.0)$$

a pro hranici pozorovatelnosti:

$$S_K = 85 \cdot \sqrt{S_{T1}^2 + S_{T2}^2 + \dots + S_{Tn}^2} \quad (3.1)$$

Tímto výpočtem je stanoven konstantní výkonu pecních transformátoru ke zkratovému výkonu sítě v místě napojení.[1]

2.1.3 Možnosti snížení rušivých účinku elektrických obloukových pecí na napájecí síť

a) Omezení zkratových a velkých proudů

Protože nejvyšší úbytky napětí vznikají při největších proudech, je snahou omezit právě tyto špičky. Toho se dosahuje zapojením reaktoru do série s pecním transformátorem. Z důvodu stability střídavého oblouku je nutné připojení indukčnosti. Ke zkratovým a velkým proudům dochází především při natavování taveniny. Po natavení taveniny se předřazená tlumivka vyřadí. Je rovněž možné, provést tlumivku několika-stupňovou.

b) Zvětšení zkratového výkonu v místě připojení

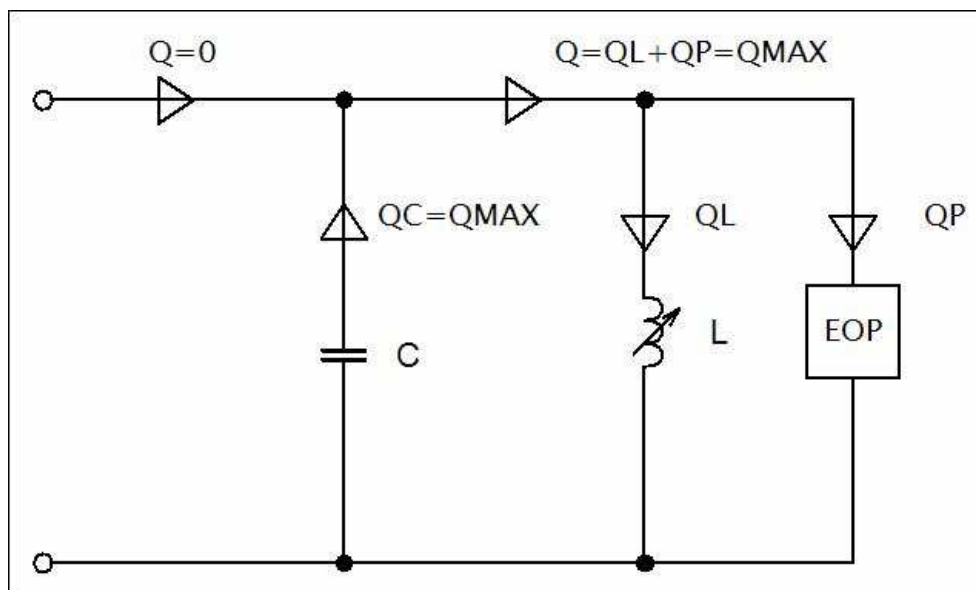
Zkratový výkon je veličina primárního významu pro velikost kolísání napětí v síti. Pro stávající elektrické obloukové pece lze podle výkonu pecního transformátoru zjistit požadovanou velikost zkratového výkonu v místě připojení a síť dle toho upravit. Zvýšení zkratového výkonu se provádí:

- zesílením sítě, což znamená zdvojení přívodů, zvětšení transformátoru, dále připojení nového generátoru a podobné úpravy. Toto řešení je sice nákladné, ale v dnešní době stejně nutné rekonstruovat, protože již nevyhovují.
- připojením synchronního kompenzátoru do vhodného místa sítě

- sériovou kompenzací
- paralelní kompenzací

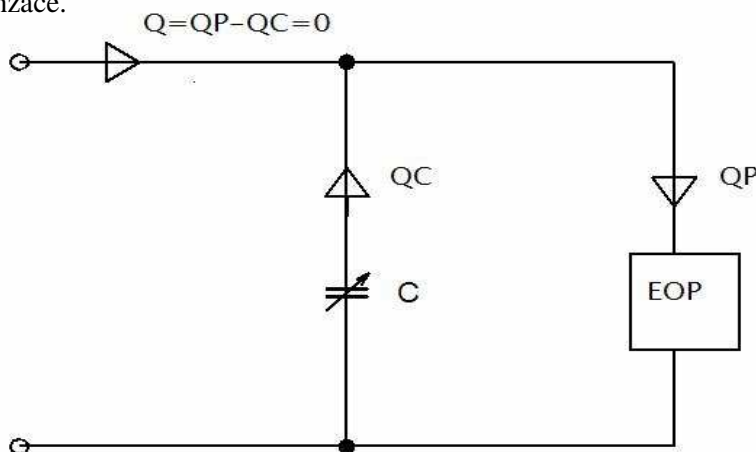
c) Zmenšení kolísání jalového příkonu elektrické obloukové pece

Lze realizovat dvěma způsoby. První způsob udržuje odběr jalové energie konstantní na maximální hodnotě. Nedochází sice ke kolísání napětí, ale účinník je trvale velmi špatný, proto se připojuje paralelně statický kondenzátor takové hodnoty, aby vykompenzoval celý jalový příkon. Tomuto způsobu se proto říká nepřímá kompenzace-obr.8.



Obr.8 Schéma nepřímé kompenzace[1]

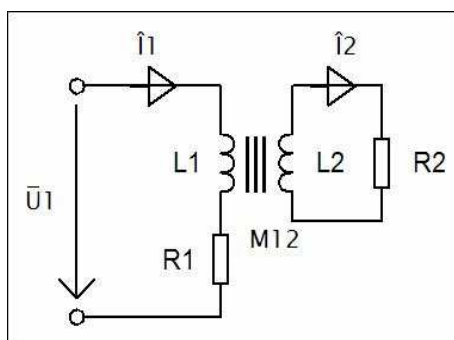
Druhý způsob provádí kompenzaci přímo podle okamžitého odběru-Obr.9. Tento způsob se nazývá přímá kompenzace.



Obr.9 Schéma přímé kompenzace[1]

2.1.4 Kanálková indukční pec

Kanálkové pece patří k velkým spotřebičům elektrické energie. Jsou-li přenosové prvky přenosové a rozvodné soustavy symetrické, jsou ztráty činného výkonu nejmenší v případě trojfázových symetrických reálných zátěží. Požadavek symetrie kanálkové pece by vedl k počtu kanálků dělitelnému třemi; jelikož je však kanálek konstrukčně nejsložitější částí pece a z hlediska poruchovosti jejím nejslabším článkem, je logické použití co nejmenšího počtu kanálků, pokud je možno se zvoleným počtem dosáhnout požadovaného výkonu elektrické symetrie se dosahuje jinými prostředky.[9] Indukční kanálková pec je v podstatě transformátor s uzavřeným železným jádrem, s primární cívkou připojenou na síť. Kanálek vyplněný roztaveným kovem je sekundární stranou transformátoru, je to vlastně závit spojený nakrátko. Elektrické indukční kanálkové pece se používají na tavení barevných kovů, zejména mědi a hliníku.[1]

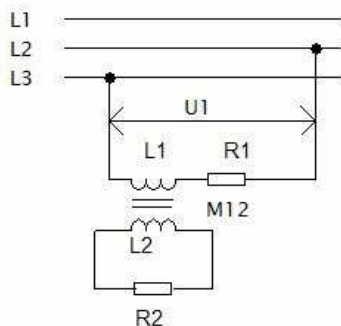


Obr.10 Elektrické schéma indukční kanálkové pece[1]

2.1.5 Připojení kanálkových pecí k síti

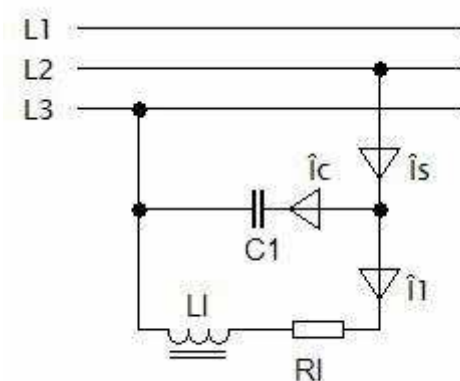
- Pece jednofázové

Jednofázové pece mají zpravidla jeden kanálek. Připojují se na fázové nebo sdružené napětí sítě 3 x 400 V, 50 Hz. Jednofázové pece se dělají až do zdánlivého příkonu 150 kVA. V hutí je zpravidla podobných pecí větší počet a jejich prostřídáním připojením k různým fázím se zhruba vyrovnává zatížení ve všech třech fázích.



Obr.11 Připojení jednofázové pece k síti[1]

Pecní cívka má indukčnost L_1 , odpor R_1 , vsázka (závit nakrátko vyplněný roztaveným kovem) má hodnoty L_2 , R_2 . Po převedení hodnot vsázky na cívku dostaneme výslednou indukčnost L_1 a výsledný odpor R_1 – zobrazeno na obr.12



Obr.12 Zjednodušení schématu pro výpočet[1]

Pec je připojena na sdružené napětí U_1 . Zatěžuje nesymetricky síť a odebírá ze sítě vedle činného výkonu i výkon jalový tím větší, čím nižší je účinník $\cos \varphi$. U pecí na tavení slitin je $\cos \varphi = 0,8$, při tavení hliníku je asi $\cos \varphi = 0,3$. Abychom odlehčili síť od dodávky jalového výkonu, připojujeme paralelně k cívce vhodně velikou kapacitu C .

Ze schématu na obr.12 můžeme napsat výraz pro proud I_s ze sítě (I_c je proud kondenzátoru, I_l je proud v pecní cívce – zanedbáváme ztráty v cívce). [8]

$$\bar{I}_s = \bar{I}_l + \bar{I}_c = \frac{\bar{U}_1}{R_l + j\omega L_l} + j\omega C \cdot \bar{U}_1 \quad (\text{A; V; } \Omega; \text{H}) \quad (3.2)$$

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{U}_1}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} [R_l + j(\omega C R_l^2 + \omega C \cdot \omega^2 L_l^2 - \omega L_l)] \quad (\text{A}) \quad (3.3)$$

Potřebná kapacita pro úplnou kompenzaci jalového výkonu vyjde z podmínky, že proud I_s nebude mít jalovou složku. Oscilační obvod (L_l, C, R_l) bude vylepšen pro přiváděný kmitočet $f(\text{Hz})$. Imaginární člen výrazu (3.3) – bude roven nule. Pak:

$$C = \frac{L_l}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} \quad (\text{F; H; } \Omega) \quad (3.4)$$

U kanálkových pecí se z úsporných důvodů obvykle kompenzuje na výsledný $\cos \varphi = 0,95$. Ušetří se část kondenzátorové baterie, proud I_s ze sítě je větší než by byl při úplné kompenzaci.

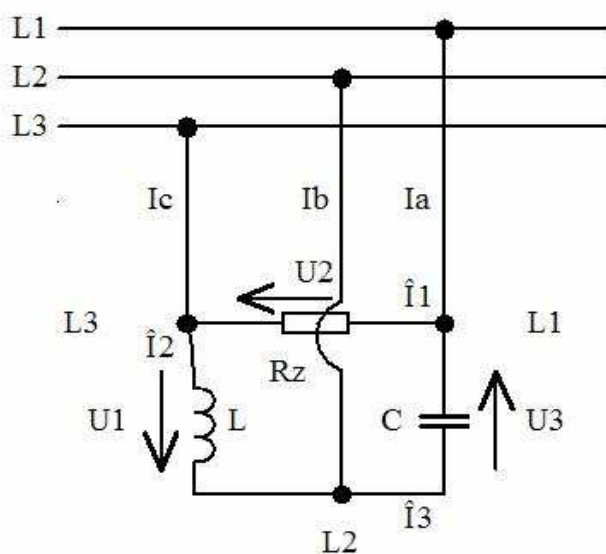
V některých případech je žádoucí učinit takové opatření , aby jednofázová indukční pec zatěžovala symetricky všechny tři fáze. Především připojíme k peci paralelně kondenzátor C. Z výrazu pro I_s vidíme, že indukční pec v tomto případě odebírá pouze činný proud:

$$I_s = \frac{U_1}{R_I^2 + (\omega L_I)^2} \cdot R_I \quad (A) \quad (3.5)$$

Vyladěný obvod pece (L_I, C, R_I) se chová vůči síti jako činný zatěžovací odpor R_Z :

$$R_Z = \frac{U_1}{I_s} = \frac{R_I^2 + (\omega L_I)^2}{R_I} \quad (\Omega) \quad (3.6)$$

Symetrického zatížení trojfázové sítě vyladěnou jednofázovou pecí lze dosáhnout pomocí tzv. symetrizačního zařízení. Je to umělá zátěž, sestávající ze tří větví. V jedné větvi je odpor R_Z , nahrazující vyladěnou indukční pec. Ve druhé větvi je indukčnost L vhodné velikosti a ve třetí větvi je vhodné veliká kapacita C . Tyto tři větve symetrizačního zařízení mohou být zapojeny do trojúhelníka nebo do hvězdy . V obou případech lze dosáhnout při správném sledu fází přesně symetrického zatížení všech tří fází při $\cos\varphi=1,0$. [1]

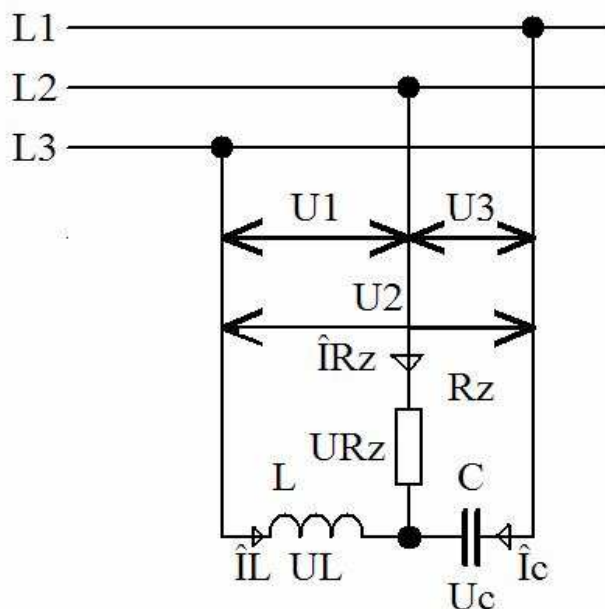


Obr.13 Symetrizační zařízení zapojené do trojúhelníka [1]

Pro velikost potřebné indukčnosti L a kapacity C platí:

$$L = \frac{\sqrt{3}R_Z}{\omega}; C = \frac{1}{\omega\sqrt{3}R_Z}; \omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{3}R_Z \quad (H; F; \Omega) \quad (3.7)$$

Symetrizace se dosáhne pouze při správném sledu fází podle obr.12. Při montáži pece se symetrizačním zařízením se vloží do všech tří přívodů ampérmetry. Při správném sledu fází ukazují všechny tři ampérmetry stejnou výchylku. Při nesprávném sledu fází ukazují ampérmetry ve fázích I_a a I_c proud vyšší, než ve fázi I_b . Přehodíme-li mezi sebou kterékoli dva přívody, dostaneme správný sled fází.



Obr.14 Symetrizační zařízení zapojené do hvězdy[1]

Při zapojení symetrizačního zařízení do hvězdy se na peci objeví zvýšené napětí U_R rovné trojnásobku fázového napětí, což je u větších pecí výhodné.

$$L = \frac{R}{\sqrt{3}\omega}; C = \frac{\sqrt{3}}{\omega R_z}; \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (H; F; \Omega) \quad (3.8)$$

Porovnáme-li s rovnicí (3.7) vidíme, že při symetrizačním zapojení do hvězdy je potřebná indukčnost 3krát menší a potřebná kapacita 3krát vyšší než při zapojení do trojúhelníka. V obou případech vztaheno na zatěžovací odpor R_z . Protože při zapojení do hvězdy je pro pec stejného příkonu zatěžovací odpor R_z 3krát vyšší (napětí na peci je $\sqrt{3}$ krát větší), jsou skutečné hodnoty L a C v obou případech přesně stejné.[1]

2.2 Elektrická trakce a elektrická vozba

Použitím elektrické energie pro pohon hnacích kol hnacích vozidel vzniká druh dopravy nazvaný elektrická vozba. Způsob pohonu hnacích kol elektrickým motorem má odborný název elektrická trakce a samotný elektromotor se nazývá trakční motor. Začátky elektrické trakce sahají do první poloviny minulého století. Tehdy se dělaly pokusy se stejnosměrnými motory se stálými magnety. Jako zdroj napětí byly použity galvanické články umístěné na vozidlech.

Stejnosměrný trakční motor s výhodnými vlastnostmi pro pohon vozidel vznikl po vynálezu dynama. Trojfázový asynchronní motor byl pro elektrickou trakci poprvé použit ve Švýcarsku. Technická složitost přívodu a složité řízení otáček jsou příčinou, že se tento motor jako trakční používá velmi zřídka. Nejvýraznější rozvoj elektrické trakce souvisí se zdokonalením stejnosměrného motoru se sériovým buzením.

2.2.1 Nevýhody elektrické trakce

- a) vysoké investiční náklady na stacionární elektrická zařízení
- b) závislost na dodávce elektrické energie
- c) větší odběr elektrické energie v zimě na vytápění vozů

2.2.2 Rozdělení elektrické trakce v ČR

- a) Druhy elektrické vozby

- hlavní, dálkové dráhy,
- městské dráhy,
- předměstské dráhy,
- podzemní dráhy (metro),
- průmyslové dráhy,
- důlní dráhy (povrchové, hlubinné),
- silniční trolejové dráhy.

- b) Napěťové soustavy trakčního rozvodu

Stejnosměrné soustavy:

250 V - důlní hlubinné dráhy,

600 V - městské dráhy kolejové a silniční trolejové

750 V - metro

1 500 V - železnice a průmyslové dráhy,

3 000 V - železnice a předměstské dráhy.

Jednofázová střídavá soustava:

25 kV, 50 Hz - hlavní dráhy.

V jiných zemích se používají různá napětí a často nižší frekvence (16 2/3 nebo 25 Hz)

c) Rozdělení podle přívodu elektrické energie do vozidla

- nezávislá trakce (zdroj elektrické energie je umístěn na vozidle),
- závislá trakce (elektrická energie je přiváděna do vozidla z trakčního vedení sběračem), → z pohledu napěťové nesymetrie je pro nás více důležitá.

2.2.3 Závislá trakce

U závislé trakce se elektrická energie přivádí do vozidla z trakčního vedení vhodným sběračem, a proto je vozidlo závislé na rozvodu elektrického proudu.

Hnací vozidlo odebírá elektrickou energii buď z trolejového vedení pantografovým sběračem (a kolejnice plní funkci zpětného vedení), nebo z třetí kolejnice, uložené izolovaně (metro).

Trolejbusy mají vrchní trolejové vedení dvojpólové. Závislá trakce je při výstavbě investičně náročnější než nezávislá trakce. Je třeba vybudovat stacionární elektrická zařízení, tj. přívodní vedení vn a vvn, měničny pro stejnosměrnou trakci, napájecí stanice pro střídavou trakci, spínací stanice, rozvodny trakčního proudu a trakční vedení.[10]

2.2.4 Trakční napájecí stanice pro soustavu 25 kV, 50 Hz-Trakční transformovny

Jsou napájeny přímo z 3-fázového rozvodu 110 kV mají následující **výhody**:

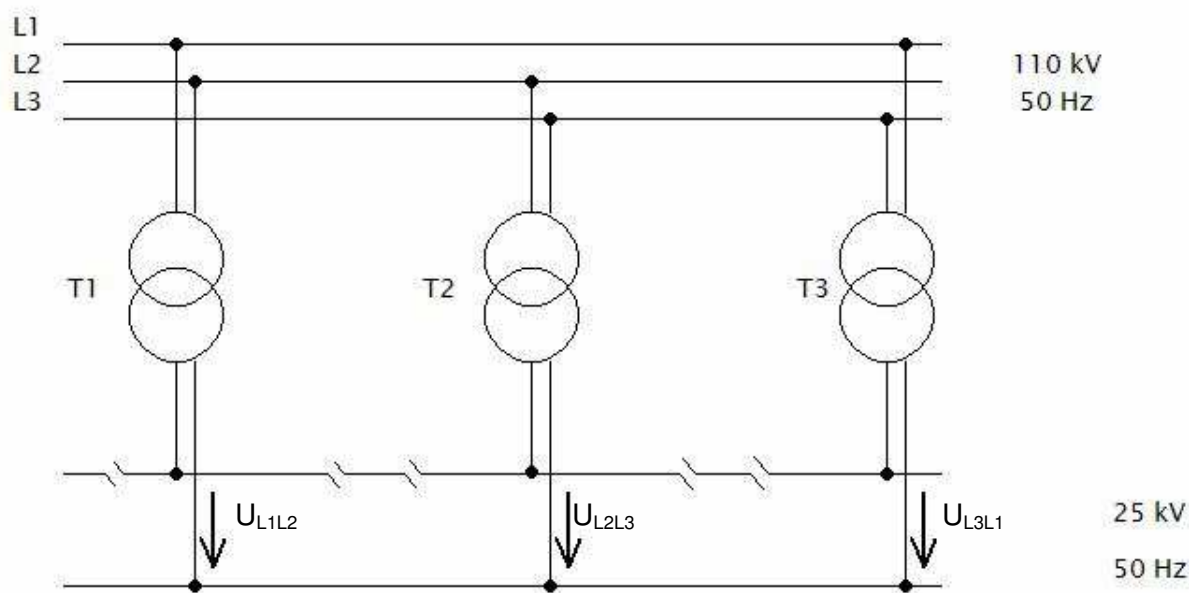
- provádějí jednoduchou jednofázovou transformaci napětí,
- vzhledem k napětí 25 kV může být jejich vzdálenost až 50 km,
- činné ztráty transformoven jsou nízké,
- mohou být jednoduše i dálkově řízené.

Nevýhodami jsou:

- nesymetrické zatěžování 3-fázové sítě vvn,
- nesinusový proud odebíraný vozidly s usměrňovači, který způsobuje vznik vyšších harmonických v trakčním vedení a napájecí soustavě,
- proměnlivý fázový posun základní harmonické proudu proti napětí v trakčním vedení, který znesnadňuje kompenzaci účinníku.

Snížení nepříznivých vlivů na síť 110 kV :

- napájecí 3-fázová síť vvn musí mít dostatečně velký zkratový výkon, aby nesymetrické zatížení nezpůsobilo nedovolenou nesymetrii úhlovou a napěťovou mezi fázemi,
- trakční výkonová zátěž být co nejrovnoměrněji rozdělená na všechny 3 fáze napájecí soustavy vvn.



Obr.15 Napájení trakční sítě 25 kV,50 Hz jednofázovými transformátory[2]

Jedním z možných řešení je napájení pomocí jednofázových transformátorů, připojených postupně na všechna tři sdružená napětí soustavy 110 kV (obr.16). Za předpokladu, že zatížení transformoven je přibližně stejné a že jsou napájeny z téhož vedení vvn, vzniká jen nepatrná nesymetrie v síti 110 kV. Druhý předpoklad však nelze ve členité energetické soustavě ČR splnit, proto se tento způsob napájení u ČD nepoužívá. Při tomto způsobu napájení je napěťový rozdíl mezi sousedními napájecími úseky rovný 25 kV, proto se mezi úseky vkládá úsek bez napájení, který vozidla projíždějí setrvačností. Při použití pouze úsekového děliče by mohl oblouk vytažený sběračem vozidla při jeho přejíždění způsobit mezifázový zkrat.[2]

U ČD se používá zapojení dvou jednofázových transformátorů do V. Primáry transformátorů jsou zapojeny na rozdílná sdružená napětí, při stejném odběru v obou napájecích úsecích a při stejném napětí a účinníku v sekundánech vzniká proudová a výkonová nesymetrie 50%. Při jiných podmínkách se může proudová nesymetrie měnit v mezích 0 - 100%. Nesymetrie způsobená nevyváženým trakčním odběrem má nepříznivé účinky na trojfázovou síť 110kV.

Napěťová nesymetrie je povolena normou ČSN ve výšce 2 % a je definována jako poměr zpětné a sousledné složce napětí, $\frac{U_2}{U_1} \cdot 100$. Při jednofázovém odběru z trojfázové symetrické soustavy platí pro nesymetrii přibližný vztah:

$$\text{Činitel nesymetrie } \rho_U = \frac{P_1}{P_Z} \cdot 100 \leq 2\% \quad (3.9)$$

kde P_1 je maximální odebíraný jednofázový výkon,

P_Z trojfázový zdánlivý zkratový výkon v místě odběru.

To znamená, že trakční transformovna smí odebírat jednofázový výkon, který je nejvýše 1/50 zkratového výkonu trojfázové sítě.

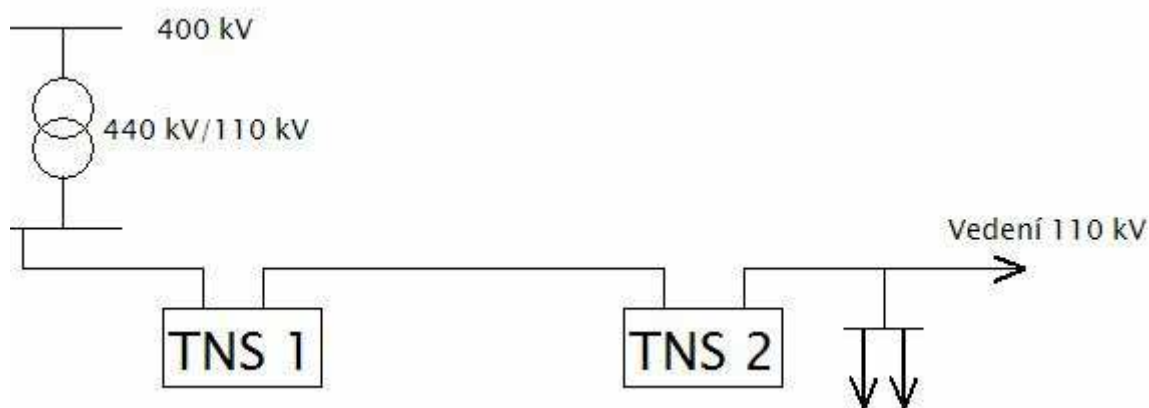
Nesymetrie napětí způsobuje přídavné ztráty v synchronních generátorech, nerovnoměrné oteplení statoru a tím i snížení výkonu stroje.

U asynchronních motorů způsobuje napěťová nesymetrie asi 5x větší nesymetrii proudovou (tj. při 2% napěťové nesymetrie asi 10% nesymetrie proudové), která má za následek snížení výkonnosti motorů.

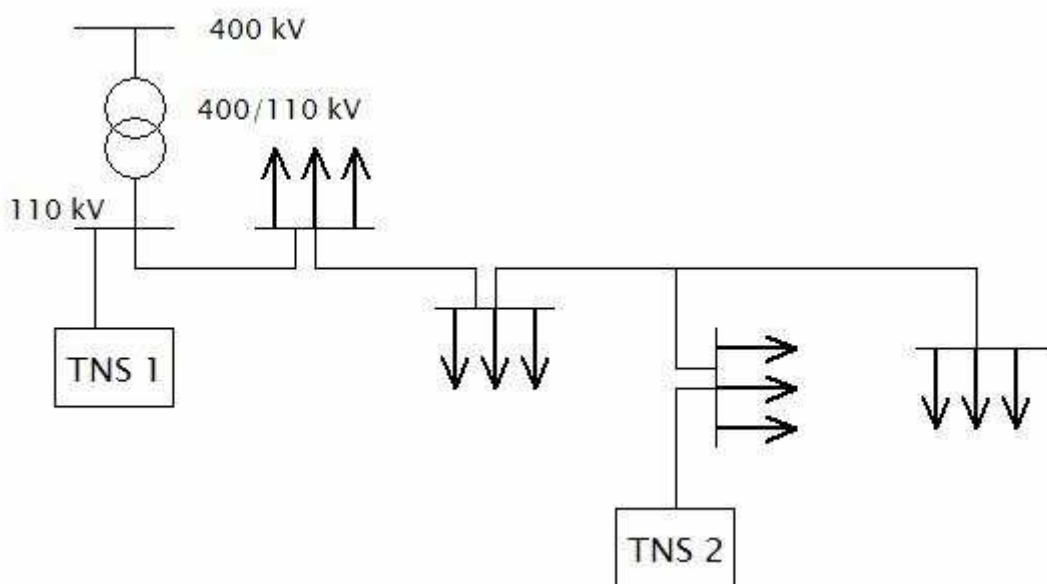
Z těchto důvodů je při napájení trakční sítě 25 kV, 50 Hz nutné budovat transformovny v místech s velkým zkratovým výkonem sítě 110 kV, aby účinky nevyváženého trakčního odběru byly minimální.[2]

2.2.5 Paralelní spolupráce trakčních transformoven 25kV, 50 Hz

Základní podmínkou paralelní spolupráce trakčních transformoven je aspoň přibližná shoda napětí obou transformoven co do velikosti i natočení fázorů. Shodné natočení fázorů lze realizovat připojením trakčních transformátorů napájejících sousední úseky na stejnou dvojici fází v případě, že sousední trakční transformovny jsou buď připojeny průběžně na vedení 110 kV souběžné s tratí, nebo aspoň na vedení 110 kV vycházející ze stejné nadřazené transformovny 400/110 kV obr.17 a),b). Paralelní spolupráce trakčních transformoven napojených přes vedení 110 kV na různé nadřazené soustavy 400 kV se nedoporučuje (byly by tím dvě soustavy 400 kV vzájemně propojeny pouze přes trakční vedení). V případě napájení podle obr.17 a) by ovšem fázory napětí také nebyly zcela shodné vlivem úbytku napětí na vedení 110 kV. V případě podle obr.17 b) by velikost fázorů napětí jednotlivých trakčních transformoven byla ovlivněna rozdílnou délkou obou vedení 110 kV, nestejnými výkony jimi přenášenými a také parametry těchto vedení.[2]



a)



b)

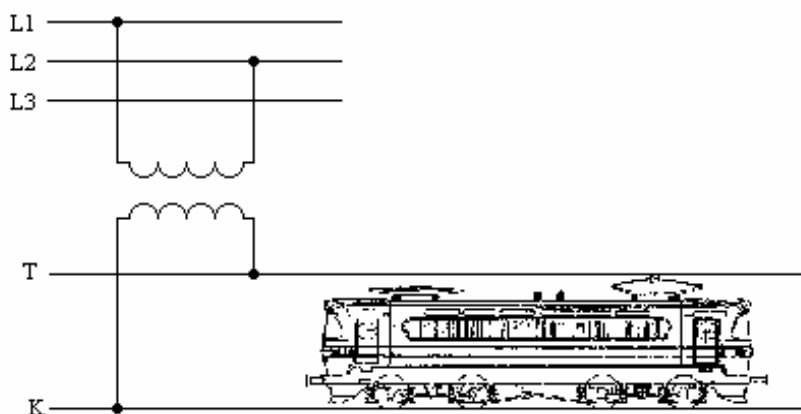
Obr.16 Připojení trakčních transformoven vhodná pro paralelní spolupráci[2]

Následkem nestejných napětí paralelně spolupracujících trakčních transformoven poteče trakčním vedením vyrovnávací proud bez ohledu na velikost trakčního konzumu. Pro nejpříznivější případ, kdy délka vedení 110 kV a trakčního vedení shodná (asi 40 km u ČD), bude trakčním vedením přenášeno cca 3,6 % výkonu, který by jinak přenášelo vedení 110 kV (pro dvoukolejnou trať). Ztráty v trakčním vedení se při paralelní spolupráci částečně sníží, hlavně u méně zatížených tratí.

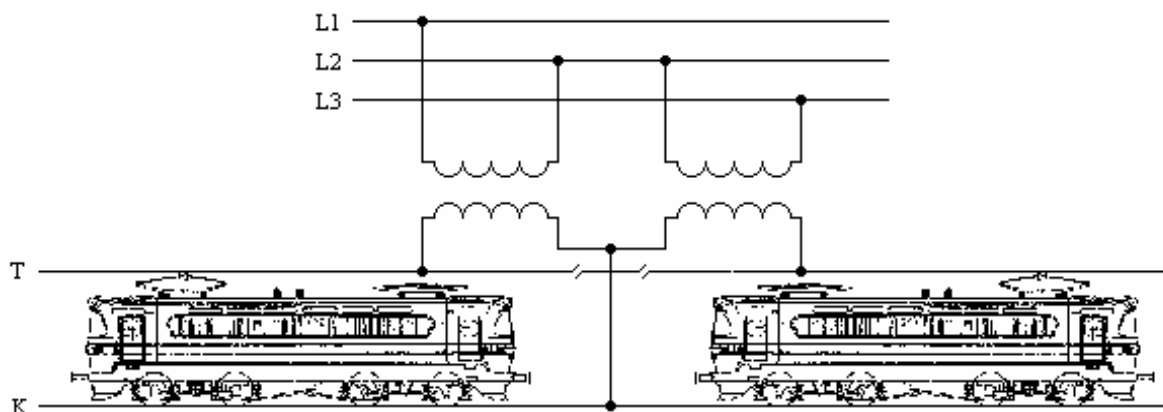
2.2.6 Vliv jednofázových drah na symetrii sítě vvn

Zatímco trakční napájecí stanice stejnosměrných drah působí na napájecí síť 110 kV jako souměrný třífázový spotřebič, způsobují dráhy s jednofázovou trakční proudovou soustavou dosti značnou symetrii. Napěťová nesymetrie zmenšuje zatížitelnost spotřebičů, asynchronní motory zatěžuje zpětným momentem, zvětšuje ztráty a snižuje životnost spotřebičů.

Nesymetrii, kterou způsobuje jednofázová trakce, lze do jisté míry omezit vhodným způsobem zapojení trakčních transformátorů (V-spojení, Scottův transformátor, třífázové spojení, Le Blancův transformátor a jiné). U ČD jsou trakční transformátory připojeny buď jednofázově nebo ve V-spojení.[2]



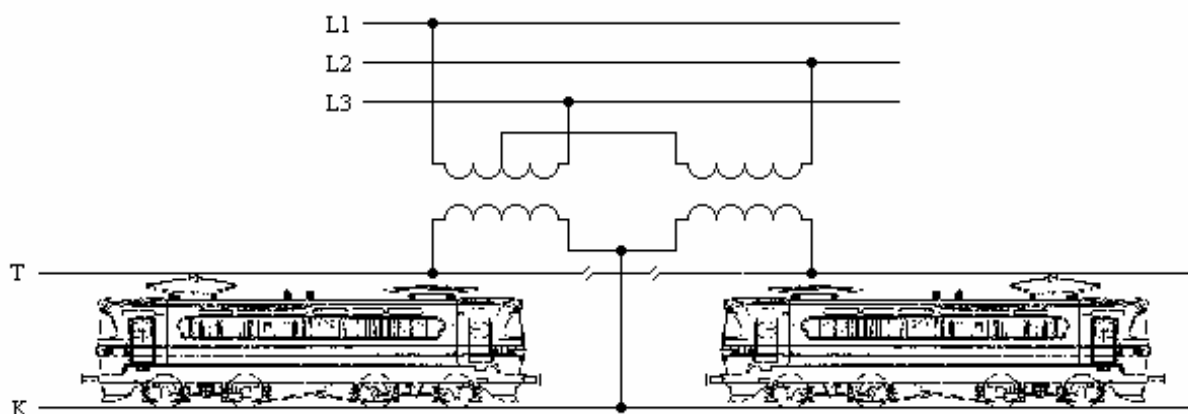
Obr. 17 Schéma připojení jedním transformátorem [3]



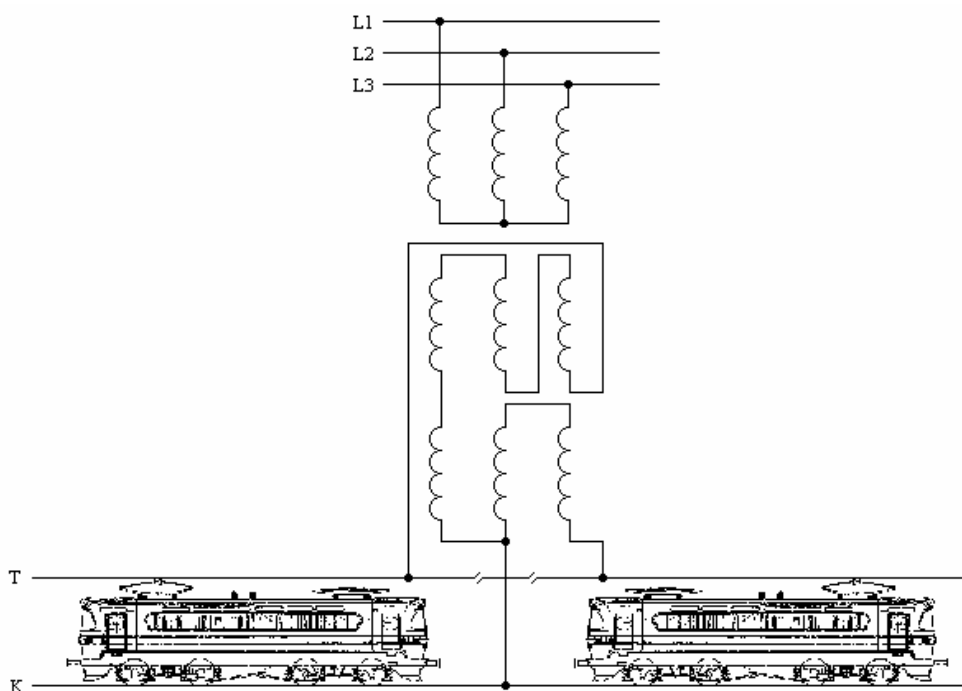
Obr. 18 Schéma připojení dvěma transformátory (V-spojení)[3]

2.2.7 Speciální konstrukce transformátorů

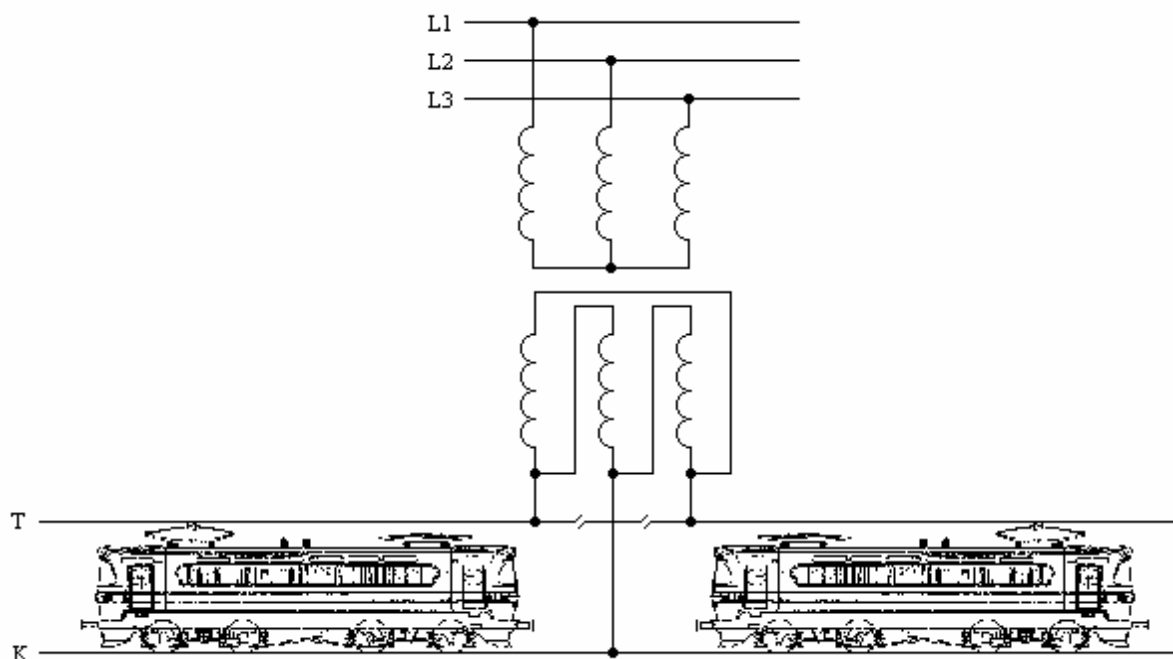
Pro zlepšení nesymetrie bylo vytvořeno několik typů transformátorů, které snižují nebo za určitých podmínek zcela vylučují napěťovou nesymetrii. Nejvíce rozšířen je Scottův transformátor, u kterého je při stejném zatížení obou napájecích úseků nulová nesymetrie. U ČD se transformátory se speciální konstrukcí nepoužívají. [3]



Obr. 19 Schéma Scottova transformátoru[3]



Obr. 20 Schéma Leblancova transformátoru[3]



Obr. 21 Schéma trojfázového transformátoru[3]

2.2.8 Možnosti omezení nesymetrie

Na velikosti nesymetrie způsobené nesymetrickým spotřebičem mají vliv také jiné odběry v téže síti. Pokud převládají souměrné odběry, je součinitel nesymetrie ρ_i malý. Pro jedno fázové připojení trakčního transformátoru dostáváme:

$$\rho = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I + I_z} \cdot 100 \quad (4.0)$$

kde I_z je proud vyvolaný souměrnou třífázovou zátěží (odebírání pouze souslednou složku).

Asynchronní motory zapojené v dané síti představují pro zpětnou složku proudu malou impedanci a tak mohou symetrii zlepšit (ovšem za cenu zkrácení vlastní životnosti).

Určitou možnost pro omezení nesymetrie odběru představuje zapojení z obr.22. Proměnné symetrizační prvky L a C mohou vykompenzovat nesymetrii trakčního odběru pouze pro $\cos \varphi \in \langle 1; 0,866 \rangle$, přitom zhoršují účinník v síti vvn. Vzhledem k tomu, že účinník trakčního konzumu u střídavých drah značně kolísá (s nejnižšími hodnotami kolem 0,6 a průměrnými hodnotami kolem 0,75), je nevyhnutelné řešit symetrizaci v komplexu s řešením kompenzace účinníku.

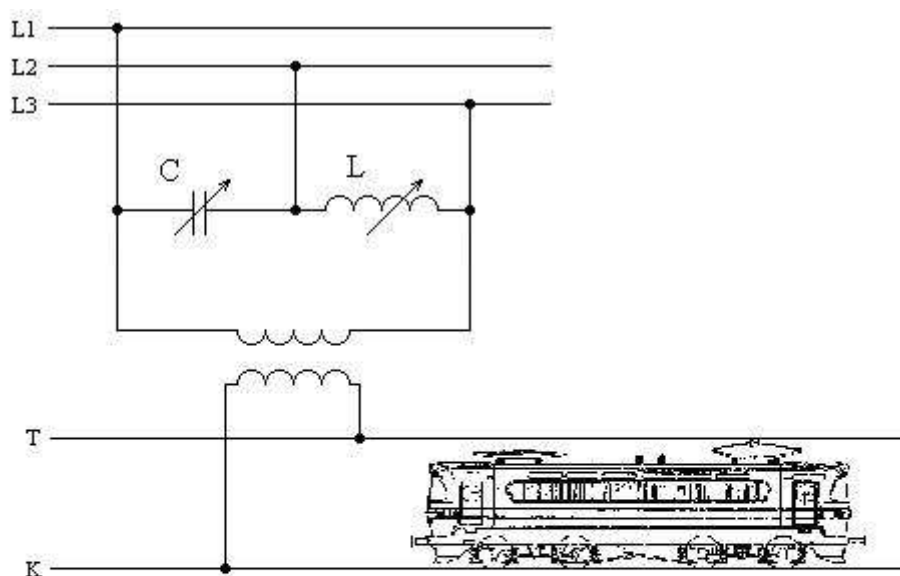
Pro orientaci o možnosti jednofázového připojení trakční transformovny v určitém místě sítě vvn slouží přibližný vztah pro součinitel napěťové nesymetrie:

$$\rho_U \cong \frac{s^{(1)}}{s_{sk0,01}^{(3)}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.1)$$

kde $s^{(1)}$ je výkon jednofázového odběru (MVA),

$s_{sk0,01}^{(3)}$ je souměrný třífázový zkratový výkon sítě vvn v místě připojení (MVA)

Měření sousledných a zpětných složek proudů se provádí většinou statickými filtry, které propouštějí jen složku souslednou nebo zpětnou podle sledu fází jejich připojení.[2]

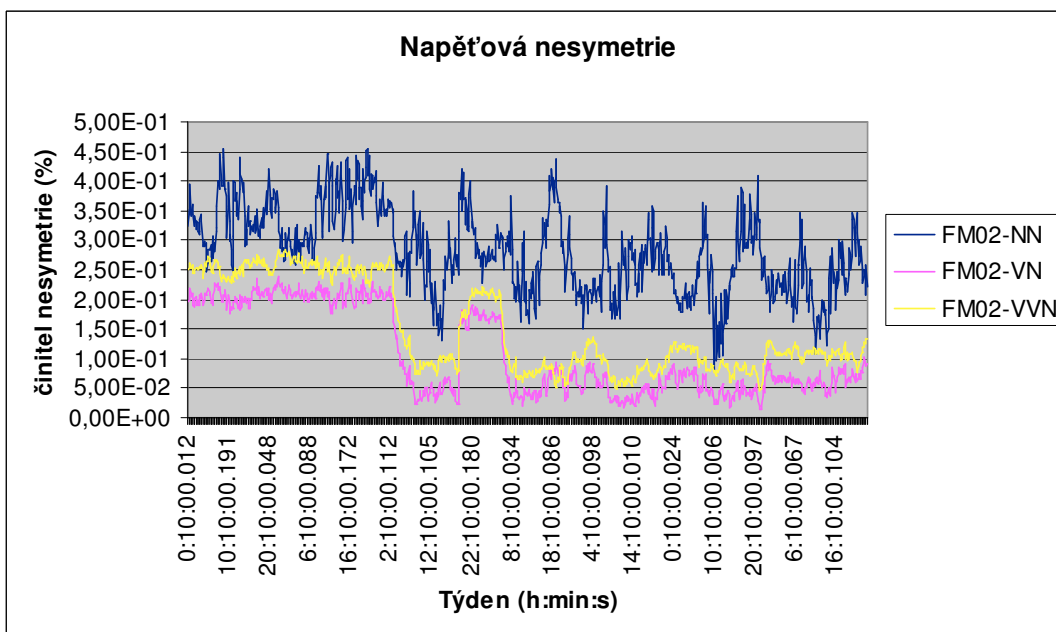


Obr.22 Zapojení pro omezení nesymetrie[2]

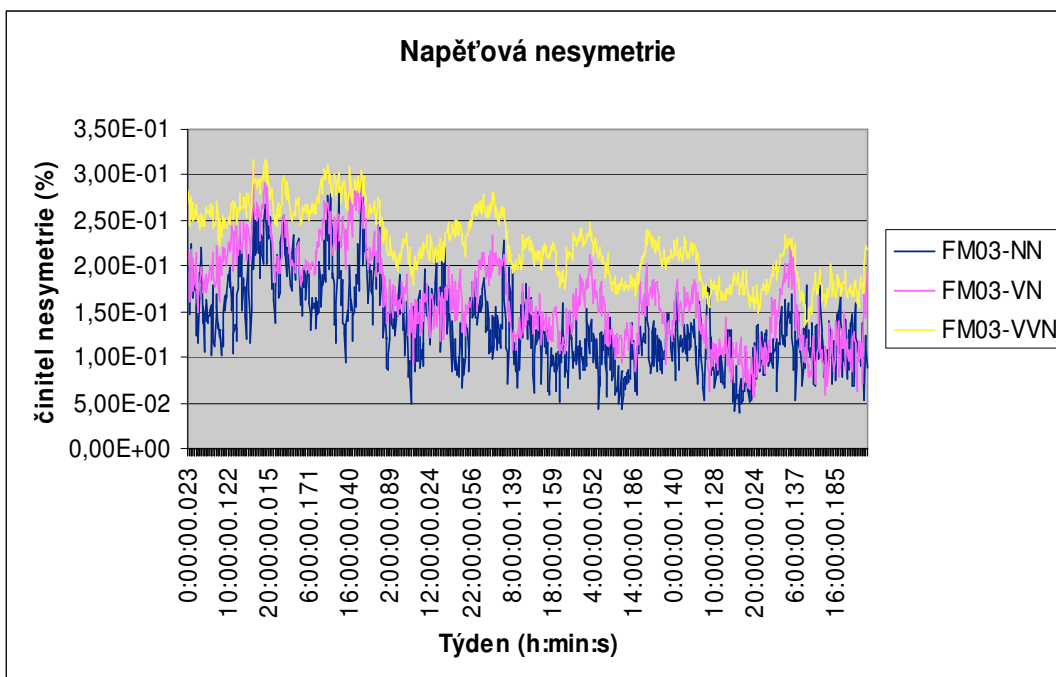
3. Ukázka vyhodnocení nesymetrie napětí v distribučních sítích

Jako ukázkou jsem uvedl data z měření v roce 2010 v lokalitě Frýdek-Místek pro NN, VN a VVN, měřilo se pomocí síťových analyzátorů PNA firmy Elcom. Podle normy ČSN EN 50160 se měření napětíové nesymetrie provádí za normálních provozních podmínek v libovolném týdenním období.

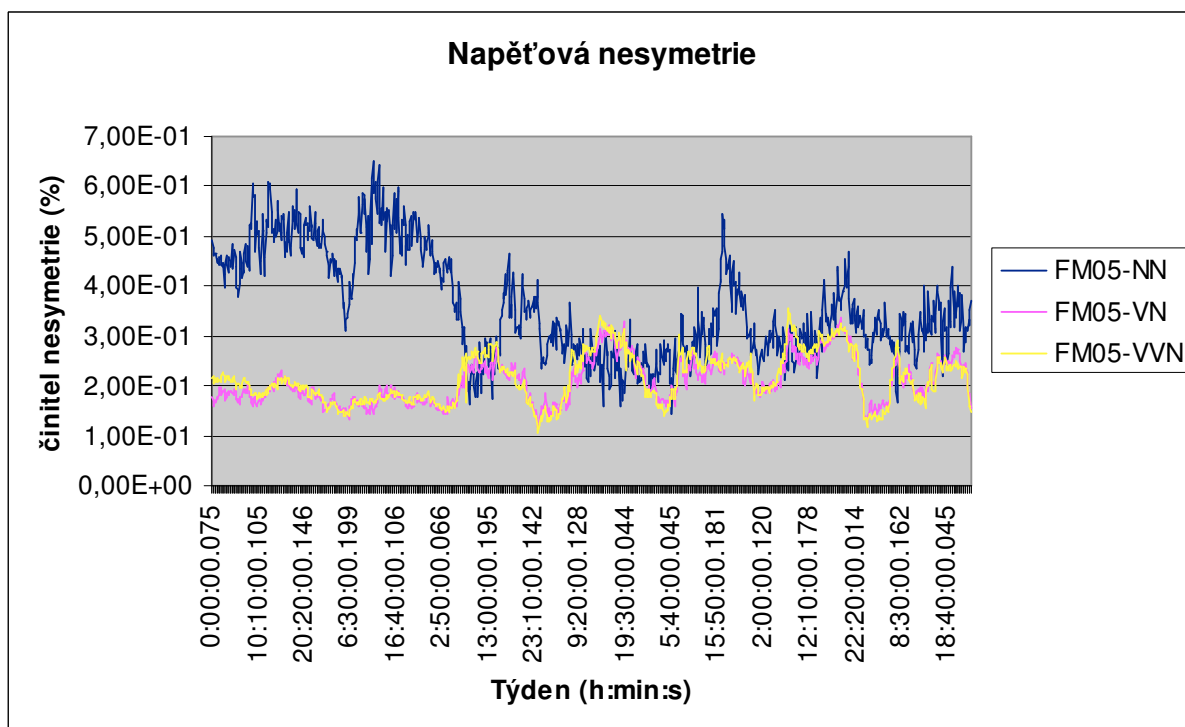
A porovnává se 95 % desetiminutová střední efektivní hodnota zpětné složky (základní) napájecího napětí v rozsahu 0 až 2 % sousledné složky



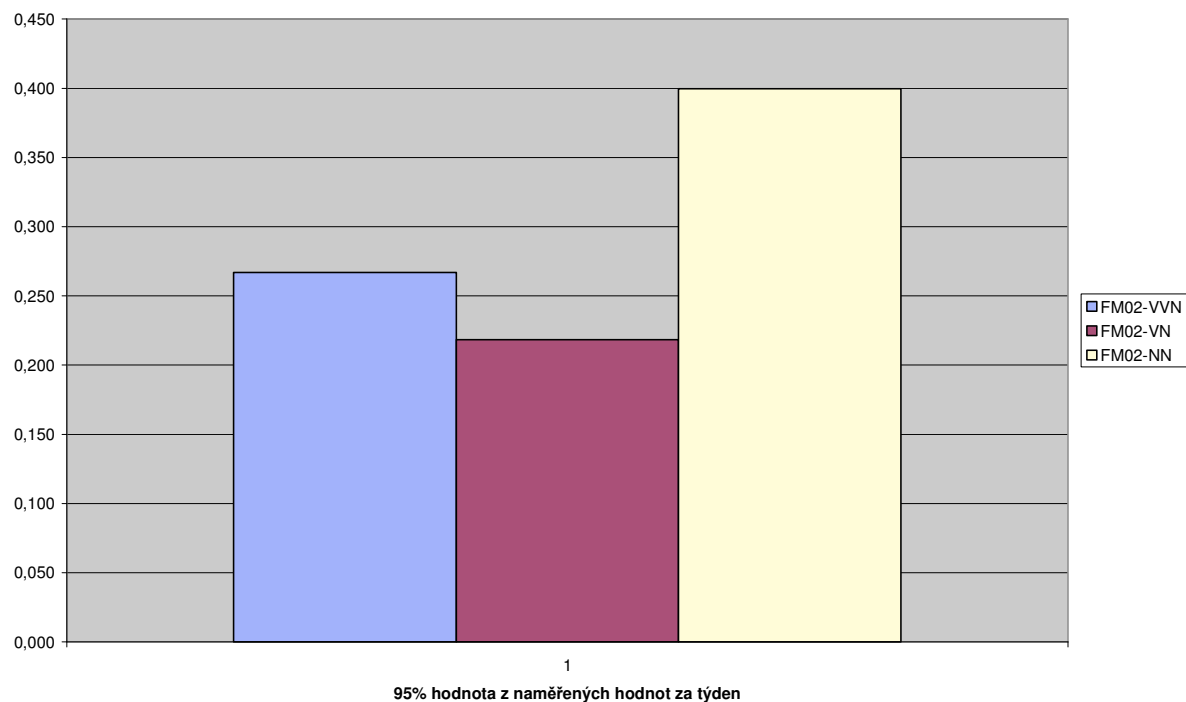
Graf 1. Napětíová nesymetrie v místě FM02



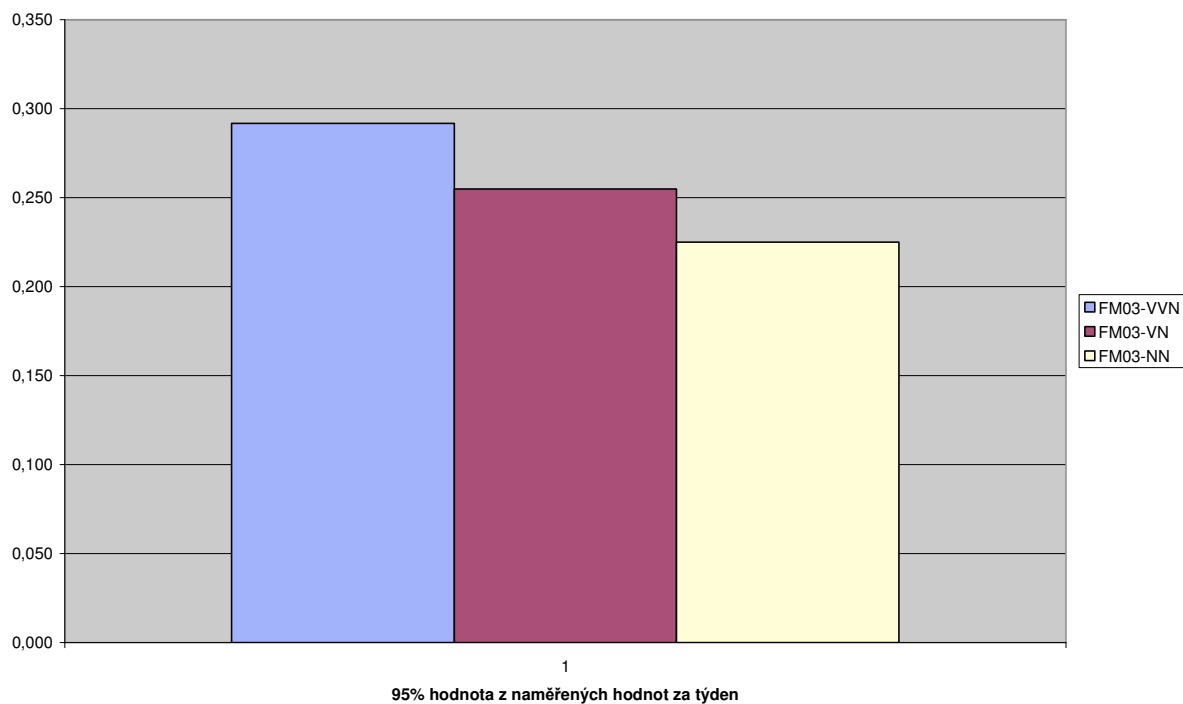
Graf 2. Napětíová nesymetrie v místě FM03



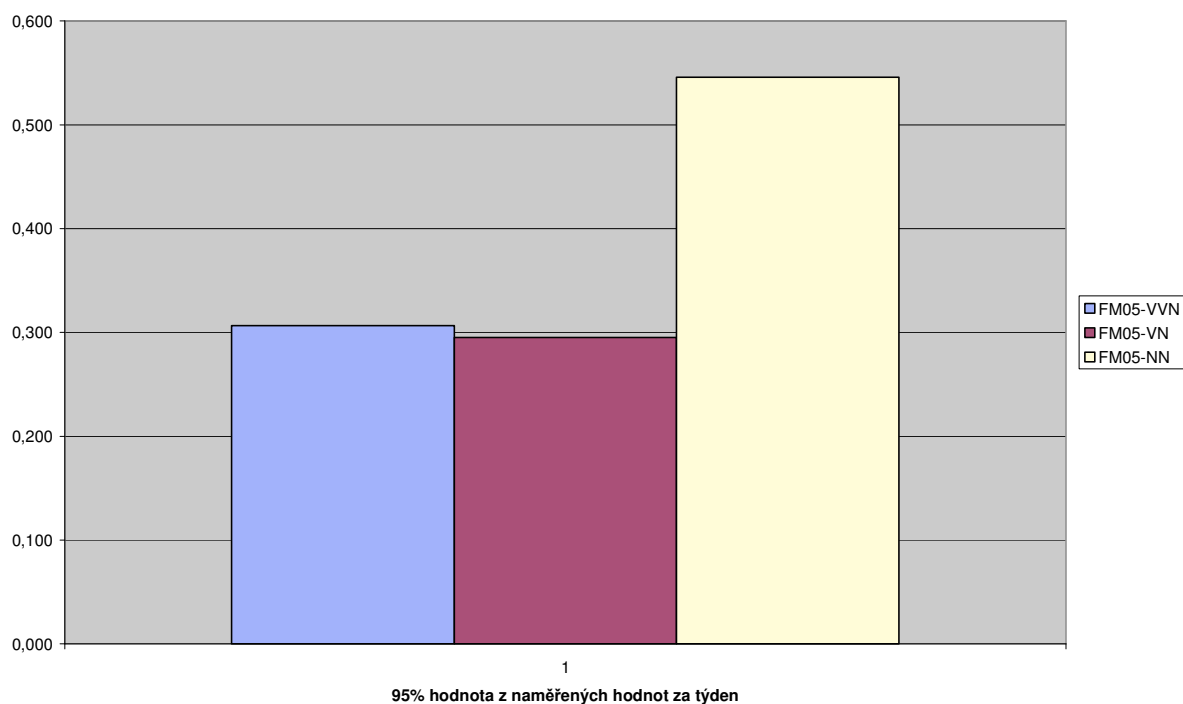
Graf 3. Napěťová nesymetrie v místě FM05



Graf 4. 95% hodnota z týdenních naměřených hodnot místa FM02



Graf 5. 95% hodnota z týdenních naměřených hodnot místa FM03



Graf 6. 95% hodnota z týdenních naměřených hodnot místa FM05

Dle pravidel provozování distribučních soustav, schválené energetickým regulačním úřadem, musí být 95% hodnota napěťové nesymetrie z vyhodnocovacího intervalu jednoho týdne pohybovat na hladině NN do 2 %, VN do 2 % a VVN do 1,5%.

Závěr

Odběr by měl být symetrický, ale jelikož máme v České republice na distribuční síť připojeny takové zátěže, zpravidla jednofázové s velkými příkony (např. elektrické obloukové pece mívají příkon až 50 MVA), tak z toho důvodu nám vznikají dynamické odchylky napětí tzv. napěťová nesymetrie. Napěťovou nesymetrii můžeme vyčíslit pomocí symetrických složek, jako jsou sousledná, zpětná a nulová (dříve se používal název netočivá). Z vyjmenovaných tří složek má největší význam z pohledu nesymetrie složka zpětná, protože tato složka je rozhodující pro rušení spotřebičů připojených do sítě. Díky těmto jednofázovým zátěžím s velkými příkony, musíme síť symetrizovat pomocí tzv. symetrizačních členů. Každé symetrizační zapojení je specifické pro určitý zdroj nesymetrie.

V této bakalářské práci jsem blíže definoval dva zdroje nesymetrie - elektrické pece (obloukové, indukční kanálkové) a elektrickou trakci 25 kV/ 50 Hz. U elektrických obloukových pecí se snížením nesymetrie dosahuje pomocí zapojení přímé a nepřímé kompenzace, tvořené prvky indukčnosti a kapacitou. Nesymetrii způsobenou elektrickou indukční kanálkovou pecí, snížíme symetrizačními členy zapojené do hvězdy a trojúhelníka. U druhého zdroje nesymetrie což je jednofázová elektrická trakce 25kV/50Hz, se symetrizuje pomocí různých zapojení transformátorů k síti. U ČD se transformátory zapojují jednofázově na síť a nebo tzv. V - spojením, dále může být zapojení transformátorů, které se u nás nepoužívá jako jsou LeBlanc, Scottovo, třífázové a jiné zapojení transformátorů.

Na závěr jsem provedl z naměřených dat z oblasti Frýdek-Místek, srovnání napěťových hladin (NN,VN,VVN) a vliv napěťové nesymetrie na tyto hladiny. A výsledkem je, že napěťová nesymetrie má největší vliv na nízkonapěťové hladiny napětí.

Seznam použité literatury

MONOGRAFIE

- [1] HRADÍLEK, Z.: *Elektrotepelná technika*, skriptum VŠB - TU Ostrava, 1996. 237 s. ISBN 80-7078-323-9
- [2] HORÁK, K., DRÁBEK, J., PALEČEK, J., POKORNÝ, M.: *Energetika a trakce*, skriptum VŠDS v Žiline, Alfa Bratislava, 1983. 382 s.
- [3] KREJČÍ, P.: *Problematika napěťové nesymetrie v třífázových soustavách*. Diplomová práce VŠB-TU Ostrava, 1998

ELEKTRONICKÉ ZDROJE

- [4] KONFERENCE ERU 2008 : *VIII. odborná konference zaměřená na energetické rušení v průmyslových a distribučních sítích* : (harmonické, kolísání napětí, nesymetrie a impulzní rušení) : 27.11.-28.11.2008, [hotel Santon, Brno]. CD-ROM. ISBN 978-80-254-3821-3
- [5] *Není elektrika jako elektrika* [online]. © 2009 [cit. 2010-11-05]. Dostupný z WWW: <<http://3pol.cz/668-neni-elektrika-jako-elektrika>>.
- [6] *Zařízení elektrických obloukových pecí (EOP)* [online]. © 2008 [cit. 2010-11-10]. Dostupný z WWW: <http://metalurgie-oceli.webz.cz/2_5_1.html>.
- [7] *Kvalita elektrické energie-průvodce* [online]. © 2005 [cit. 2010-11-17]. Dostupný z WWW: <http://www.medportal.cz/files/file/lpq_cz/5_1_3.pdf>.
- [8] *Transformátor na změnu počtu fází* [online]. © 2007 [cit. 2010-12-05]. Dostupný z WWW: <http://stag.zcu.cz/fel/kev/zei/krasl/Podklady_ke_studiu/El_stroje/Rozsirene_el_stroje/Trafa/kapitola2-2-9.pdf>.
- [9] *Výpočet Scottova zapojení transformátoru* [online]. © 2003 [cit. 2010-11-15]. Dostupný z WWW: <http://ladislav.prskavec.net/old/download.php?source=pdf/2002_12_Elektroenergetika_2003.pdf>.
- [10] *Trakce* [online]. © 2006 [cit. 2011-04-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/enz%20trakce%20skripta.pdf>>.
- [11] *A flexible 4kW - 3 Phase - 2 Switch PFC Power Rectifier for Supplying a Modern EDM Machine* [online]. © 2006 [cit. 2010-11-24]. Dostupný z WWW: <http://leiwww.epfl.ch/publications/andrianirina_rufer_giandomenico_besson_pcm_05.pdf>.

Seznam obrázků

- Obr.1 Náhrada nesouměrné soustavy soustavou souslednou, zpětnou a nulovou[3]
- Obr. 2 Připojení jednofázové zátěže k trojfázové soustavě[3]
- Obr. 3 Schéma Steinmetzova zapojení[4]
- Obr.4 a) Transformace jednofázové soustavy na dvoufázovou [8]
- Obr.4 b) Transformace trojfázové soustavy na dvoufázovou (Scottovo zapojení)[8]
- Obr.5 Zapojení LeBlancova transformátoru[11]
- Obr.6 Fázorový diagram LeBlancova zapojení[11]
- Obr.7 Schéma připojení elektrické obloukové pece[6]
- Obr.8 Schéma nepřímé kompenzace[1]
- Obr.9 Schéma přímé kompenzace[1]
- Obr.10 Elektrické schéma indukční kanálkové pece[1]
- Obr.11 Připojení jednofázové pece k síti[1]
- Obr.12 Zjednodušení schématu pro výpočet[1]
- Obr.13 Symetrizační zařízení zapojené do trojúhelníka[1]
- Obr.14 Symetrizační zařízení zapojené do hvězdy[1]
- Obr.15 Napájení trakční sítě 25 kV,50 Hz jednofázovými transformátory[2]
- Obr.16 Připojení trakčních transformoven vhodná pro paralelní spolupráci[2]
- Obr. 17 Schéma připojení jedním transformátorem [3]
- Obr. 18 Schéma připojení dvěma transformátory (V-spojení)[3]
- Obr. 19 Schéma Scottova transformátoru[3]
- Obr. 20 Schéma Leblancova transformátoru[3]
- Obr. 21 Schéma trojfázového transformátoru[3]
- Obr.22 Zapojení pro omezení nesymetrie[2]

Seznam grafů

- Graf 1. Napěťová nesymetrie v místě FM02
- Graf 2. Napěťová nesymetrie v místě FM03
- Graf 3. Napěťová nesymetrie v místě FM05
- Graf 4. 95% hodnota z týdenních naměřených hodnot místa FM02
- Graf 5. 95% hodnota z týdenních naměřených hodnot místa FM03
- Graf 6. 95% hodnota z týdenních naměřených hodnot místa FM05